УДК 548.4:001.621.791.052.08:620.179.16

МЕХАНИЗМ ЗАРОЖДЕНИЯ, ФОРМИРОВАНИЯ И ДИАГНОСТИКА НЕПРОВАРА В ПРОЦЕССЕ СВАРКИ. Ч. 1

А.М. Апасов, А.А. Апасов

Юргинский технологический институт Томского политехнического университета
E-mail:adm@ud.tpu.edu.ru

Приведены результаты модельных и экспериментальных исследований процесса зарождения, формирования и развития непровара в процессе сварки. Данные модели позволили затем одновременно осуществлять регистрацию непровара в реальном масштабе времени и формировать управляющие сигналы для коррекции параметров режимов сварки.

1. Анализ дефектов в сварных соединениях

Анализ причин отказов, выхода из строя и аварий машин, агрегатов и конструкций показывает, что в большинстве случаев это происходит в результате наличия дефектов в конструкционных элементах, допущенных в процессе их изготовления или возникших при эксплуатации [1]. Дефекты существенно сокращают долговечность конструкционных элементов, а период развития усталостных трещин в зависимости от условий эксплуатации, режима циклического нагружения и величины концентрации напряжений может составлять существенную, а в ряде случаев и преобладающую часть общей долговечности конструкционного элемента.

Весьма большую группу технологических дефектов составляют дефекты сварки. При циклическом нагружении непровары, поры, шлаковые включения и их цепочки оказывают значительное влияние на сопротивление усталости сварных соединений металлов [2–4], особенно, если они расположены в зоне остаточных растягивающих напряжений [4]. Степень опасности таких дефектов для материалов, работающих при малоцикловом нагружении, принято оценивать по коэффициентам снижения усталостной прочности K_f [3] и коэффициентам деформаций K_ε [5], используемых для расчета долговечности до зарождения трещины.

Полученные значения K_f для различных типов дефектов при ручной электродуговой сварке, выполненной различными сварочными материалами, применяемыми для исследования сталей, представлены в [1].

Сопоставление с расчетными значениями $K_{\varepsilon_{max}}$ демонстрирует достаточно хорошее совпадение результатов для одиночных дефектов типа пор и шлаковых включений. Для острых дефектов типа непровара и

цепочек шлаковых включений, имеющих нерегулярную форму, расчетные значения $K_{\varepsilon_{max}}$ оказываются выше, чем экспериментальные значения K_f. Значения коэффициентов K_ε для различных видов сварочных дефектов в малоуглеродистых низколегированных сталях находятся в следующих пределах [3]:

Поры	2...3
Шлаковые включения	3...5
Острые шлаковые включения	5...7
Цепочка шлаковых включений и пор	6,5...9
Непровар	9...15

Представление о степени снижения пределов выносливости в зависимости от размеров дефектов в сварных соединениях конструкционных сплавов дают результаты в табл. 1 и на рис. 1 [3], рис. 2, *а, б* [1].

Таблица 1. *Коэффициенты снижения усталостной прочности для сварных соединений (ручная сварка) с дефектами при малоцикловом нагружении [3]*

Марка стали	Электроды	Тип дефекта	Размеры дефекта, мм	K_f
15Х2МФА	Н6	Шлаковые включения	1 3,5	1,60
			2 3	1,95
			2,8 3	2,25
		Непровар	4...5	4,00
		Непровар	10	5,00
22К	УОНИ – 13/45	Шлаковые включения	1 3,5	1,4
			2 3	1,55
			2,8 3	1,85
		Непровар	2...3	2,85
			4...6	3,70
0Х18Н10Т	18 Cr 16 Ni 2 Mo	Шлаковые включения	2 3	1,18
			3 3	1,44
			4 3	1,84
		Непровар	5	2,70

Теоретическая оценка коэффициентов концентрации напряжений (с помощью решения Нейбера) в непроварах [1] показала, что для глубокого непровара (занимающего 50 % толщины сечения) теоретический коэффициент концентрации равен 23; действительные напряжения на расстоянии 0,5...1 мм от основания непровара превышают номинальные в 5,5...8,2 раз. При малом непроваре (6...7 % толщины сечения) максимальный теоретический коэффициент концентрации равен 4, а действительные напряжения на расстоянии 0,5...1 мм от поверхности дна непровара в 1,7...2 раза превышают номинальные.

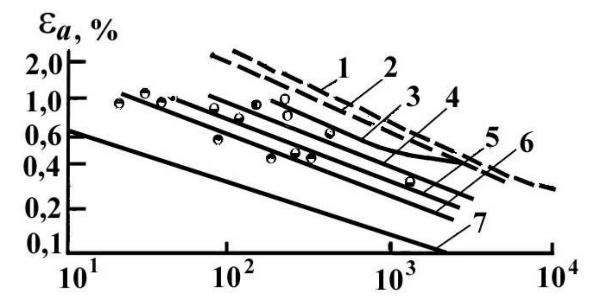
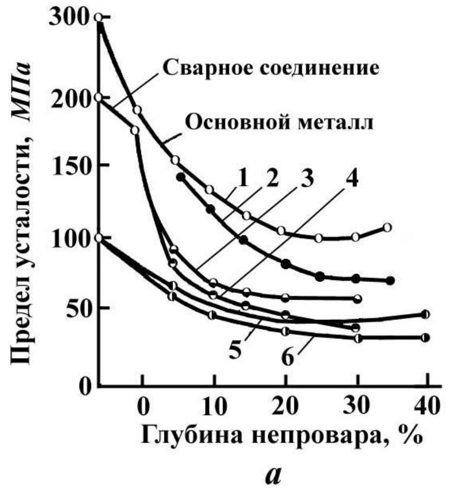


Рис. 1. *Малоцикловая усталость сварных соединений из стали 15Х2МФА с внутренними технологическими дефектами [1]: 1 и 3) разрушение образцов без дефекта и с ним; 2) появление трещины в образцах без дефекта; 4—7) появление трещины в образцах со шлаком диаметром, равным 1,0; 2,0; 2,8 мм и непроваром*

В целом вопрос о влиянии пор, неметаллических включений, непроваров на статическую и циклическую прочность конструктивных элементов в конечном счете не может с достаточной для практики точностью быть решен только расчетным способом и требует, как правило, экспериментального обоснования путем испытаний образцов, моделей, а в ряде случаев и натурных испытаний конструкций.

Обычно для контроля качества сварных соединений используют акустические методы: теневой,



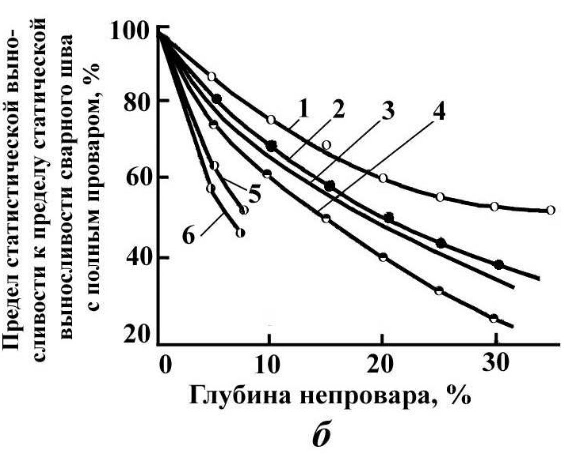


Рис. 2. *Влияние глубины непровара на усталость сварных швов: а) влияние глубины непровара на предел выносливости сварных образцов — сталь марки 30ХГСА. Сечение: 1) ослабленное непроваром; 2) без учета ослабления, сталь марки 1Х18Н9Т: 3), ослабленное непроваром; 4) без учета ослабления, дуралюмин марки Д16Т; 5) ослабленное непроваром; 6) без учета ослабления; б) прочность стыковых швов при повторно-статических нагрузках — сталь марки 30ХГСА. Сечение: 1) ослабленное непроваром; 2) без учета ослабления, дуралюмин марки Д16Т; 3) ослабленное непроваром; 4) без учета ослабления, сталь марки 1Х18Н9Т; 5) ослабленное непроваром; 6) без учета ослабления*

зеркально-теневой, эхо-импульсный [6]. Общим их недостатком является наличие временной мертвой зоны, представляющей собой неконтролируемый поверхностный слой, в котором эхо-сигнал от дефекта не отделяется от зондирующего. Кроме того, определение характера дефектов, в том числе особо опасных плоскостных дефектов с малым раскрытием (трещин, тонких непроваров), с точки зрения эксплуатационной надежности изделий – одна из наиболее трудных задач для ультразвукового контроля. До настоящего времени многие инструкции и нормы оценки качества изделия исходят из предположения о невозможности определить характер дефекта с помощью ультразвука [7].

Наиболее перспективен способ контроля качества сварного соединения, заключающийся в приёме сигналов акустической эмиссии (АЭ), рождаемых исследуемым швом, подсчёте количества импульсов и их интенсивности, по которым судят о качестве сварного шва, причём с целью повышения достоверности и уменьшения трудоёмкости при контроле сварных соединений типа труба – трубная доска, прием сигналов АЭ осуществляют в момент производства сварного шва в двух точках отдельных частей сварной конструкции пьезопреобразователями, один из которых устанавливается на трубе, а другой – на трубной доске, и по соотношению количества импульсов АЭ и их интенсивности на разных пьезопреобразователях судят о качестве сварного соединения, в частности, о наличии непровара [8].

Отметим недостатки данного способа:

1. Не рассматривается физическая природа источников, объясняющих причину зарождения непровара.
2. Не разработан механизм зарождения, формирования и развития непровара.
3. В качестве информативного параметра используется интенсивность импульсов АЭ, характеризующая скорость появления дефектов, но не установлен тот тип параметра АЭ-излучения, который непосредственно свойственен процессу зарождения и развития непровара, в частности, при импульсной аргонодуговой сварке изделий из однородного металла.

Поэтому основной задачей исследования является выявление механизма зарождения, развития и формирования непровара в процессе сварки.

2. Решение динамической задачи термоупругости на границе основного и наплавленного металла

Поставленная задача решается следующим образом [9]. По границе сплавления основного и наплавленного металла шва при импульсном нагреве и интенсивном охлаждении при сварке изделий из однородного металла изменение температурного поля вызывает термические напряжения (пики). Поэтому данная задача относится к категории нестационарной, в связи с чем необходимо учитывать инерционные члены, так как они будут вносить существенный вклад в окончательное решение. В данном случае решается одномерная задача термоупругости. При этом учитываются инерционные члены в уравнениях движения упругой среды, а искомое выражение сводится к уже известному решению задачи Даниловской [10].

Предположим, что температура упругой среды задана как функция координаты x и времени t, т.е. $T=T(x,t)$. Напряжения, возникающие из-за неравномерного распределения температуры, будут зависеть от координаты x и времени t. При этом принимаем напряжения X_y, X_z и смещения v, w равными нулю. Тогда два уравнения движения упругой среды удовлетворяются тождественно и остаётся лишь одно уравнение

$$\frac{\partial X_x}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}. \qquad (1)$$

Дифференцируя обе части ур. (1) по x и подставляя вместо производной её выражение через напряжения согласно обобщенного закона Гука, получим:

$$a^2 \frac{\partial^2 X_x}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 X_x}{\partial t^2} = s \frac{\partial^2 T}{\partial t^2}, \qquad (2)$$

где $a = \sqrt{\dfrac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$ – скорость распространения упругой волны; λ и μ – постоянные Ламе; ρ – плотность; $s=\alpha(2\mu+3\lambda)$ – постоянная, имеющая размерность напряжения; α – коэффициент линейного расширения.

Решим задачу о импульсном нагреве границы упругого полупространства, основываясь на ур. (2). Прежде всего, будем исходить из условия, что температура $T(x, t)$ полупространства удовлетворяет:

– уравнению теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, (x \ge 0, t \ge 0); \qquad (3)$$

– начальному условию

$$T(x,t)\big|_{t=0} = 0; \qquad (4)$$

– граничному условию

$$T(x,t)\big|_{x=0} = T_0. \qquad (5)$$

Тогда решение ур. (3) при условиях (4) и (5) в символах операционного исчисления будет иметь вид:

$$T^* = \frac{T_0}{p} \exp(-x\sqrt{\frac{p}{k}}), \qquad (6)$$

где

$$T^*(x,p) = \int_0^\infty T(x,t) e^{-pt} dt. \qquad (7)$$

Напряжение X_x, возникающее вследствие мгновенного нагрева, удовлетворяет:

– ур. (2);

– начальным условиям

$$X_x\big|_{t=0} = \frac{\partial X_x}{\partial t}\bigg|_{t=0} = 0; \qquad (8)$$

– граничному условию

$$X_x\big|_{x=0} = 0; \qquad (9)$$

– предельному условию, т.е. X_x остаётся конечным при $x\to\infty$.

В результате анализа полученного решения установлено, что до момента времени $t=x/a$ напряжение X_x растёт от 0 до некоторого отрицательного значения, величина которого всегда меньше, чем sT_0. В момент времени $t=x/a$ (т.е., в тот момент времени, когда упругая волна, начавшая свое движение от границы полупространства в момент $t=0$, достигнет фиксированного сечения) напряжение X_x делает скачок на величину sT_0 в область положительных значений и затем быстро убывает до 0.

На рис. 3 представлена графическая зависимость изменения напряжения X_x с течением времени в сечении $\xi=1$.

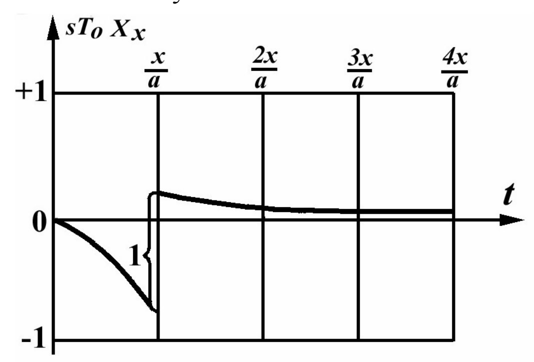


Рис. 3. *Зависимость изменения напряжения X_x с течением времени в сечении $\xi=1$*

Следовательно, при мгновенном (импульсном) нагреве границы упругой среды в ней возникают кратковременные растягивающие и сжимающие напряжения порядка sT_0. Без учета инерционных членов в уравнениях движения упругой среды напряжения X_x были бы равными 0.

Схема непровара представлена на рис. 4.

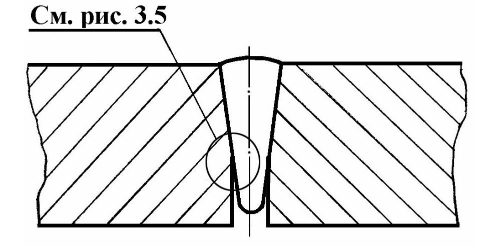


Рис. 4. *Схема непровара*

Следует отметить, что сварочный процесс представляет собой технологическую операцию, в результате которой реализуется атомарная связь на контактных поверхностях двух сварочных заготовок. В связи с этим на рис. 5 представлена сферолитная модель непровара, на которой наглядно представлено распределение сил межатомного взаимодействия. В частности, внутри кристалла каждый атом удерживается в своем положении силами связи, симметрично распределенными между окружающими его со всех сторон соседними атомами. На свободной поверхности кристалла, имеющейся в результате образования непровара, атом находится рядом с другими, лежащими с ним в одной плоскости и в плоскости, находящейся непосредственно ниже, однако над ним отсутствуют соседние атомы. Вследствие этого силы, удерживающие поверхностные атомы, несимметричны, и эти атомы не могут принять положения, соответствующего равновесному состоянию и наименьшей энергии кристалла.

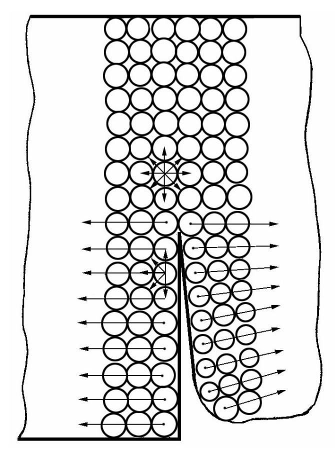


Рис. 5. *Сферолитная модель непровара с распределением сил межатомного взаимодействия*

Таким образом, структура кристалла на его свободной поверхности и непосредственно под ней оказывается искаженной. Локальное искажение является признаком запасённой энергии точно так же, как если бы подобные искажения возникли в результате действия внешней нагрузки. Такая форма энергии наблюдается на всех свободных поверхностях кристалла, поэтому её называют поверхностной энергией. Следовательно, силы межатомного взаимодействия атомов, находящихся на свободной поверхности кристаллов, неуравновешены, а сами атомы на поверхности непровара уже находятся в напряженном состоянии и, тем более, те, которые расположены в устье непровара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трощенко В.Т., Красовский А.Я., Покровский В.В., Сосновский Л.А., Стрижало В.А. Сопротивление материалов деформированию и разрушению. Ч. 2. – Киев: Наукова думка, 1994. – 704 с.
2. Большова К.М. Магнитный метод определения предела усталости // Заводская лаборатория. – 1947. – № 1. – С. 58–64.
3. Лебедев Г.А., Маринец Т.К., Ефремов А.И. Исследование циклической прочности металлов методом записи диаграмм усталости / Циклическая прочность металлов. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – С. 141–146.
4. Писаренко Г.С., Красовский А.Я., Йокобори Т. Экспериментальное изучение и анализ кинетики пластической зоны. – Киев, 1980. – 66 с. (Препр. АН Украины ИПП).

5. Голуб В.П. Циклическая ползучесть жаропрочных никелевых сплавов. – Киев: Наукова думка, 1983. – 224 с.
6. Неразрушающий контроль металлов и изделий. Справочник под ред. Г.С. Самойловича. – М.: Машиностроение, 1976. – 456 с.
7. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля: Практ. пособие / И.Н. Ермолов, Н.П. Алёшин, А.И. Потапов; под ред. В.В. Сухорукова. – М.: Высшая школа, 1991. – 283 с.
8. А.с. 567128 СССР. Способ контроля качества сварного соединения / В.М. Белов, Ю.И. Болотин. Бюлл. изобр., 1977, № 28.
9. Пат. 2212030 РФ. Способ обнаружения непровара / А.М. Апасов, А.А. Апасов. Бюлл. изобр., 2003, № 25. – С. 564.
10. Даниловская В.И. Температурные напряжения в упругом полупространстве, возникающие вследствие внезапного нагрева его границы // Прикладная математика и механика. – 1950. – Т. 14, вып. 3. – С. 316–318.

УДК 621.315.687.3:519.863